受害马尾松针叶营养及次生物质含量与思茅松毛虫种群参数的相关分析

周 索[1]，陈顺立[2,*]，陈德兰[3]，吴 晖[2]，张飞萍[2]，张潮巨[2]，杜瑞卿[1,2]
（1. 河南南阳师范学院生命科学与技术学院，河南南阳 473061；2. 福建农林大学林学院，福州 350002；
3. 武夷山市林业局，福建武夷山 354300）

摘要：为了揭示受害马尾松 *Pinus massoniana* 针叶主要化学物质变化对思茅松毛虫 *Dendrolimus kikuchii* Matsumura 种群变动的影响，本研究以受思茅松毛虫危害程度不同（轻度、中度和重度）的马尾松针叶喂养思茅松毛虫幼虫，测定思茅松毛虫饲养种群的特征参数和不同受害程度马尾松针叶营养物质与次生物质含量，用综合相关系数分析法对试验结果进行分析。结果表明：（1）随植株受害程度加重，针叶黄酮含量增加，可溶性糖、蛋白质、多糖含量减少，各龄幼虫平均历期延长、死亡率升高。单宁和总酚含量的变化与各龄幼虫平均历期、死亡率之间没有显著的相关性；（2）除6龄幼虫外，其他各龄幼虫的平均历期、死亡率均与松针营养物质和次生物质含量有直接的和综合的相关性；（3）随受害程度加重，7龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、化蛹率、雌性比、每雌生殖力减小。单宁、总酚含量的变化对7龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、幼虫平均死亡率、化蛹率、雌性比、每雌生殖力都没有显著影响。总体上，松针营养和次生物质含量对思茅松毛虫种群参数有重要影响，其重要性依次为可溶性糖 > 蛋白质 > 多糖 > 黄酮，单宁和总酚的作用相对较小。

关键词：思茅松毛虫；马尾松；营养物质；次生物质；种群参数；综合相关系数
中图分类号：Q969 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296(2012)04-0435-09

Correlative analysis between contents of nutrients and secondary substances in damaged masson pine needles and population parameters of *Dendrolimus kikuchii* (Lepidoptera: Lasiocampidae)

ZHOU Suo[1], CHEN Shun-Li[2,*], CHEN De-Lan[3], WU Hui[2], ZHANG Fei-Ping[2], ZHANG Chao-Ju[2], DU Rui-Qing[1,2] (1. College of Life Science and Technology, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China; 2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Forest Bureau of Wuyishan City, Wuyishan, Fujian 354300, China)

Abstract: In order to explore the effects of variation in chemical substances in damaged masson pine (*Pinus massoniana*) needles, on population dynamics of *Dendrolimus kikuchii*, *D. kikuchii* larvae were reared with masson pine needles with different damage degrees caused by the pest in the laboratory, its population parameters and contents of nutrients and secondary substances in damaged masson pine needles were measured, and the integrated correlation coefficient was adopted for data analysis. The results showed that with the damage increasing in masson pine needles caused by *D. kikuchii* larvae, flavones in needles increased accordingly, while contents of soluble sugars, polysaccharides and proteins decreased. The average developmental duration and mortality of *D. kikuchii* larvae increased with the damage increasing. No significant correlation was found between the variation in contents of tannins or total phenols and the developmental duration or mortality of each instar larvae. There were significantly direct and comprehensive correlations between contents of nutrients and secondary substances of masson pine needles and the developmental duration or mortality of each instar larvae excluding 6th instar larvae. With the damage increasing in masson pine needles caused by *D. kikuchii* larvae, all parameters including body weight of 7th instar larvae, needle consumption, pupal weight, emergence rate, female ratio and fecundity in *D. kikuchii* population feeding the damaged masson pine needles decreased. No significant correlation was found between the variation in contents of tannins or total phenols and

基金项目：福建省科技厅重大科技专项（2006NZ0001-2）；福建省林业厅林木种苗攻关项目（2003-07）
作者简介：周索，女，1970年生，硕士，副教授，主要从事植物学研究，E-mail: duruiqing8@163.com; zhousuo2046@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: cslfjau@126.com
收稿日期 Received: 2011-10-24; 接受日期 Accepted: 2012-03-06

population parameters of *D. kikuchii* larvae. The results suggest that the contents of nutrients and secondary substances in masson pine needles dramatically influence the population parameters of *D. kikuchii*, with the importance sequence from high to low: soluble sugars > proteins > polysaccharides > flavones. Contents of tannins and total phenols seem to have no significant influence.

Key words: *Dendrolimus kikuchii*; *Pinus massoniana*; nutrients; secondary substances; population parameters; integrated correlation coefficient

思茅松毛虫 *Dendrolimus kikuchii* Matsumura 隶属鳞翅目枯叶蛾科(Lasiocampidae)，是我国南方松树的重要食叶害虫之一，在福建省常与马尾松毛虫 *D. punctatus* Walker 混合发生危害，高海拔地区发生尤为严重。1995 年以来该虫在福建省闽北林区的光泽、邵武、建阳、建瓯、武夷山、政和等县(市)部分地区暴发成灾，针叶被食尽，松林似被火烧，部分松树被害枯死，严重影响了松林生长(陈宏胜等，2003；伍澄，2006)。该虫通常在暴发后的下一代种群数量骤减(李任波等，2002)，有关其原因及机理，研究较少。戈峰等(2002)报道了油松 *Pinus tabulaeformis*、马尾松 *Pinus massoniana*、华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* Mayr 3 种松树在受到松毛虫中等程度的危害后，能迅速产生诱导抗性，昆虫生存所必需的还原糖、氨基酸、脂肪酸、蛋白质、Vc 等营养物质减少。李镇宇等(2000)在油松对赤松毛虫 *Dendrolimus spectabilis* 的诱导化学防御研究中发现,受害油松新生针叶氨基酸总量及多数游离氨基酸含量下降,水溶性总糖、粗脂肪、生物碱含量及总糖/氨基酸比例上升。

松林受思茅松毛虫危害后针叶营养和次生物质含量发生改变，而松林受害程度又受思茅松毛虫数量及其分布特征变化的影响。松树受害后针叶营养和次生物质含量与思茅松毛虫种群参数之间应该存在相关关系。近年来，一些学者从植物和植食者关系角度来研究其周期性暴发的机理，分析松树的诱导抗虫作用对马尾松毛虫种群参数变化的影响，从昆虫营养学的角度，揭示了马尾松毛虫周期性暴发的机理(戈峰等，1997；何忠等，2007)；章康华等(2002)已证明松林受害程度与松毛虫的幼虫发育、蛹重、成虫产卵量和各虫期寄生率有密切关系。但以上报道及其他相关研究报道(严善春等，2006)主要是简单作图对应分析或简单相关分析，或做方差分析，缺少综合性分析。针叶养分是由多项指标组成的，对思茅松毛虫种群参数变化是多个指标的综合作用结果，并非独立作用。思茅松毛虫数量及其分布特征变化也是由多项指标组成的，相互间也存在复杂的影响关系。因此，应该把两组变量组综合起来研究分析，揭示它们之间复杂的相关关系，才是比较科学的合理的全面的方法。但目前，尚未见有关这方面的报道。鉴于此，本研究主要以综合相关分析方法，研究以不同受害程度松树的针叶饲喂思茅松毛虫幼虫对其种群的影响，旨在对该虫的综合治理、预测预报研究提供参考。

1　材料与方法

1.1　样地概况

本研究所选择的 8 块野外样地分别设在福建省光泽华桥林场和南平市延平区茂地乡两地，土壤类型为山地红壤。光泽华桥林场样地 4 块(轻、中、重度受害及未受害各 1 块，受害程度划分方法见 1.2)，每块 0.1 hm^2，设在大禾山工区的 8 年生松林，坡度 21°，坡向为东南坡，海拔高度 810 ~ 830 m；延平区茂地乡样地 4 块(轻、中、重度受害及未受害各 1 块)，每块 0.1 hm^2，设在宝珠村 11 年生的松林，坡度 18°，坡向为西北坡，海拔高度 690 ~ 720 m。

1.2　松林受害程度分级标准

根据森林食叶害虫危害程度分级标准(朱建华等，2002)，按松针叶被食程度将松林受害程度划分为下列 3 个等级：轻度受害(mild damage)：针叶 30% 以下被食；中度受害(moderate damage)：针叶 40% ~ 60% 被食；重度受害(severe damage)：针叶 70% 以上被食。

1.3　松针样品采集

2008 年 4 月中旬至 2009 年 4 月底，在各样地不同受害程度和未受害的马尾松树各选 2 株，于树冠中部东、西、南、北 4 个方向的当年生枝条上采摘松针 200 束，组成混合样品，带回室内洗净、烘干、粉碎后密封保存备用。

1.4　松针化学成分测定方法

黄酮测定采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法；单宁测定采用钨酸钠-磷钼酸比色法；总酚测定采用

Folin-酚法; 可溶性糖和多糖含量采用蒽酮比色法测定,蛋白质含量的测定采用凯氏定氮法(李国清和王荫长, 1997; 郝建军等, 2007)。每次各处理测定的每份样品用量为 3 g, 重复 3 次计 9 g; 每份样品重复测定 3 次。

1.5　思茅松毛虫生长发育指标观察

2009 年 6 月上旬从光泽华桥林场松林间采回卵块一批, 放在室内玻璃培养皿中, 待幼虫孵化后, 移入塑料养虫盒(直径 25 mm, 高 20 mm)中饲养; 低龄幼虫每盒饲养 50 头, 中、高龄幼虫每盒饲养 25 头。在室温 16 ~ 28℃(夜间 16 ~ 22℃、白天 21 ~ 28℃)、每日光照 8.5 ~ 10 h、RH 82% ~ 90% 条件下, 分别以轻度受害、中度受害、重度受害和未受害松林的针叶进行饲养 4 个处理, 每日投料 1 次, 低龄幼虫期每次投料 100 g, 中、高龄幼虫期每次投料 200 g。每个处理设 3 个重复, 各处理供试虫 150 头, 从初龄幼虫开始饲养至成虫产卵, 每日上午观察 1 次, 记载各处理思茅松毛虫幼虫的发育历期、死亡率、体重和成虫产卵量。

1.6　综合相关系数分析法

综合相关系数分析法, 具体方法和步骤参考杜瑞卿等(2009)。用 MATLAB7.0 和 SPSS 15.1 处理数据。

2　结果与分析

2.1　以不同受害程度的马尾松针叶饲养的思茅松毛虫种群特征

以不同受害程度的马尾松针叶饲喂思茅松毛虫幼虫, 各龄幼虫其平均历期及死亡率见表 1。对各龄的平均历期和死亡率分别进行单因素方差分析, 结果存在显著差异($P < 0.05$)。以重、中度受害的针叶饲喂幼虫, 其各龄历期普遍比未受害的延长(与未受害组比较, $P < 0.05$), 尤其是重度受害的针叶饲喂幼虫, 其平均历期达到 101.8 d, 比未受害的(86.2 d)延长了 15.6 d, 其各龄死亡率也均比未受害的明显提高(与未受害组比较, $P < 0.05$); 中度受害的针叶饲喂幼虫, 其平均历期达到 96.3 d, 比未受害的延长了 10.1 d, 其各龄死亡率也均比未受害的明显高(与未受害组比较, $P < 0.05$); 而轻度受害的针叶饲喂幼虫, 其各龄历期与未受害的相比没有显著变化($P > 0.05$), 各龄幼虫死亡率与未受害的相比没有显著变化 ($P > 0.05$)。说明松树针叶重、中度受害后对于思茅松毛虫各龄幼虫的生长发育有明显影响, 各龄死亡率上升, 历期延长。

表 1　以不同受害程度的马尾松针叶饲养的思茅松毛虫幼虫发育历期及死亡率

Table 1　Developmental duration and mortality in *Dendrolimus kikuchii* larvae feeding on masson pine needles with different damage degrees

各龄 Each instar	平均历期 Average developmental duration (d)				死亡率 Mortality (%)			
	重度 Severe	中度 Moderate	轻度 Mild	未受害 Undamaged	重度 Severe	中度 Moderate	轻度 Mild	未受害 Undamaged
1 龄 1st instar x_1	12.8 ± 1.1 *	12.1 ± 1.2 *	11.6 ± 1.0	11.2 ± 0.9	41.6 ± 5.1 *	36.6 ± 6.1 *	35.2 ± 2.8	33.6 ± 1.8
2 龄 2nd instar x_2	10.1 ± 0.8 *	9.4 ± 0.6 *	9.1 ± 0.5	8.9 ± 0.6	31.5 ± 4.1 *	27.9 ± 2.4 *	26.5 ± 3.3	27.3 ± 1.5
3 龄 3rd instar x_3	11.2 ± 1.0 *	10.8 ± 0.8 *	9.5 ± 0.9	9.2 ± 0.8	22.4 ± 3.1 *	19.6 ± 5.6 *	17.9 ± 4.1	15.7 ± 1.3
4 龄 4th instar x_4	14.5 ± 1.5 *	13.7 ± 0.8 *	12.1 ± 1.1	11.6 ± 1.4	18.3 ± 3.1 *	17.4 ± 2.2 *	17.4 ± 2.3	15.3 ± 1.7
5 龄 5th instar x_5	15.2 ± 1.3 *	14.5 ± 1.2 *	13.2 ± 1.2	12.6 ± 1.8	16.4 ± 3.2 *	11.2 ± 1.6 *	10.1 ± 0.8	12.3 ± 0.8
6 龄 6th instar x_6	16.6 ± 1.7 *	16.1 ± 1.6 *	14.3 ± 1.5	15.4 ± 1.6	18.7 ± 2.5 *	13.2 ± 1.8 *	11.6 ± 1.5	10.5 ± 1.3
7 龄 7th instar x_7	21.4 ± 1.5 *	19.7 ± 1.7 *	18.6 ± 2.1	17.3 ± 2.2	31.5 ± 2.7 *	22.3 ± 1.9 *	14.3 ± 0.6	12.4 ± 0.7
总和 Total	101.8 ± 9.3 *	96.3 ± 8.8 *	88.4 ± 8.1	86.2 ± 9.1				

* $P < 0.05$(同行同一指标受害组与未受害组的比较 The comparison between the damaged group and the undamaged group in the same row under the same index).

不同受害程度的针叶饲喂幼虫的发育历期、体重、取食量和蛹重等结果见表 2。表 2 结果表明, 第 1 代思茅松毛虫幼虫取食不同受害程度的针叶后, 其 7 龄幼虫的体重差异明显, 取食未受害针叶的体重最重, 平均体重达 9.05 g/头, 幼虫一生的平均取食量也最大, 达 30.2 g/头; 而取食重度受害针叶的 7 龄幼虫平均体重仅 5.92 g/头, 幼虫一生的取食量也最少, 仅 21.9 g/头。取食不同受害程度

的针叶，思茅松毛虫蛹的重量差异显著，取食重度受害针叶的平均蛹重为 5.02 g/头，而取食未受害竹叶的平均蛹重为 7.22 g/头。

2.2 松针营养物质以及次生物质含量测量结果

受思茅松毛虫危害后松针营养物质以及次生物质含量的测定结果见表 3。

与未受害植株比较，不同受害程度马尾松植株针叶中营养物质和次生物质含量均发生了变化。受害植株针叶中黄酮、单宁和总酚含量与未受害相比较，均呈上升趋势。植株被害越重，针叶中黄酮含量越高。针叶中单宁和总酚含量随着植株受害加重而减少。不同受害程度的马尾松针叶可溶性糖含量、多糖含量、蛋白质含量与未受害相比较，均呈下降趋势，被害越重针叶可溶性糖含量、多糖含量、蛋白质含量越少，重度危害的达到最小值，明显低于中、轻度受害和未受害。各指标方差分析，$P<0.05$。

表 2 以不同受害程度的马尾松针叶饲养的思茅松毛虫幼虫种群参数

Table 2 Population parameters in *Dendrolimus kikuchii* larvae feeding on masson pine needles with different damage degrees

针叶受害程度 Damage degree of pine needles	幼虫发育历期(d) Developmental duration Z_1	7 龄幼虫体重(g) Body weight of 7th instar larva Z_2	取食量(g) Feeding capacity Z_3	蛹重(g) Pupal weight Z_4	幼虫平均死亡率(%) Larval mortality Z_5	化蛹率(%) Pupation rate Z_6	雌性比 Female proportion Z_7	每雌生殖力(粒) Number of eggs laid per female Z_8
重度 Severe	101.8 ± 9.3 *	5.92 ± 0.8 *	21.9 ± 2.3 *	5.02 ± 0.5 *	93.56 ± 7.1 *	58.72 ± 6.8 *	0.43 ± 0.02	37.7 ± 8.9 *
中度 Moderate	96.3 ± 8.8 *	6.23 ± 0.6 *	22.8 ± 2.1 *	5.12 ± 0.5 *	91.78 ± 8.3 *	65.36 ± 5.9 *	0.45 ± 0.03	53.2 ± 9.6 *
轻度 Mild	88.4 ± 8.1	8.22 ± 0.7	28.6 ± 3.5	6.98 ± 0.6 *	78.56 ± 7.9	91.32 ± 7.1	0.47 ± 0.01	85.8 ± 11.2
未受害 Undamaged	86.2 ± 9.1	9.05 ± 0.5	30.2 ± 2.8	7.22 ± 1.2	76.46 ± 6.3	94.24 ± 9.6	0.48 ± 0.04	94.9 ± 12.5

* $P<0.05$(同一列内受害组与未受害组的比较 The comparison between the damaged group and the undamaged group in the same column). 表 3 同 The same for Table 3.

表 3 不同受害程度马尾松针叶营养物质及次生物质含量(mg/g)

Table 3 The contents (mg/g) of nutrients and secondary substances in masson pine needles with different damage degrees caused by *Dendrolimus kikuchii* feeding

针叶受害程度 Damage degree of pine needles	黄酮 Flavones y_1	单宁 Tannins y_2	总酚 Total phenols y_3	可溶性糖 Soluble sugars y_4	多糖 Polysaccharides y_5	蛋白质 Proteins y_6
重度 Severe	14.23 ± 1.1 *	28.05 ± 0.8	27.91 ± 0.5	43.12 ± 1.1 *	13.51 ± 0.4 *	23.49 ± 0.9 *
中度 Moderate	13.43 ± 0.8 *	28.56 ± 0.7 *	28.91 ± 0.6 *	43.74 ± 0.8 *	13.95 ± 0.2 *	24.26 ± 0.8 *
轻度 Mild	12.60 ± 0.8	29.40 ± 0.6 *	30.05 ± 0.6 *	45.17 ± 1.2	14.59 ± 0.4	24.67 ± 1.0
未受害 Undamaged	12.18 ± 0.9	27.65 ± 0.6	27.09 ± 0.7	45.97 ± 0.9	15.35 ± 0.3	25.41 ± 0.9

2.3 综合相关系数结果与分析

思茅松毛虫第 1 代各龄幼虫平均历期、死亡率与松针营养物质以及次生物质含量的直接相关系数见表 4 和表 5。

从表 4 可以看出，黄酮含量除 6 龄幼虫外，与各龄平均历期都有显著的正相关。单宁、总酚与各龄平均历期都无显著相关性。可溶性糖含量、多糖含量与 1，3，4，5 和 7 龄幼虫平均历期都有显著的负相关，蛋白质含量与 1，2，4，5 和 7 龄幼虫平均历期都有显著的负相关。

从表 5 可以看出，黄酮含量与 1，3，6 和 7 龄幼虫死亡率都有显著的正相关。单宁、总酚与各龄死亡率都无显著相关性。可溶性糖含量、多糖含量与 3 和 7 龄幼虫死亡率都有显著的负相关，蛋白质含量与 1，3 和 7 龄幼虫死亡率都有显著的负相关。

利用表 1 ~ 3 的数据，得出第 1 代各龄幼虫平均历期各龄的影响系数：

C_1 = (0.3755, 0.3730, 0.3481, 0.3585, 0.3618, 0.2543, 0.3760)。

从 C_1 可以看出影响最大的是 7 龄幼虫平均历期，最小的是 6 龄幼虫平均历期，但各龄的影响系数差异不大，显示它们具有相对均衡的作用。

第 1 代各龄幼虫死亡率各龄的影响系数：

C_2 = (0.3571, 0.2969, 0.3763, 0.3553,

0.2293，0.3485，0.3592）。

从 C_2 可以看出影响最大的是 3 龄幼虫死亡率，最小的是 5 龄幼虫死亡率，但各龄的影响系数差异不大，显示它们具有相对均衡的作用。

不同受害程度松树针叶营养物质以及次生物质指标的影响系数：

$T=(-0.3764, 0.1837, 0.1589, 0.3508, 0.3276, 0.3426)$。

从 T 可以看出绝对值最大的是黄酮含量（-0.3764），最小的是总酚含量（0.1589），黄酮含量的影响作用是负向的，与其他营养成分的影响作用正好相反。不同受害程度松树针叶营养物质以及次生物质各指标间的影响作用有较大差异。

不同受害程度松树针叶营养物质以及次生物质指标合成主成分 F 与第 1 代各龄幼虫平均历期合成主成 f 的相关系数为 $R=-0.9730$，$P<0.01$。

表示变量 Y_i 与变量 X_j 的综合相关系数 $T_i r_{ij} C_j / S_F S_f$、Y_i 与变量组 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的综合相关系数：$R_i(1)=\sum_{j=1}^{n} T_i r_{ij} C_j \big/ S_F S_f$，变量 X_j 与变量组 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_t$ 的综合相关系数 $R_j(2)=\sum_{i=1}^{t} T_i r_{ij} C_j \big/ S_F S_f$，见表 6。

从表 6 来看，黄酮含量（Y_1）与第 1 代各龄幼虫平均历期之间的综合相关系数都为正数，最大的是与 1 龄平均历期之间的综合相关系数（X_1）（0.0414），最小的仍是与 6 龄幼虫平均历期（X_6）之间的综合相关系数（0.0220），但各龄的综合相关系数都差异不大，说明黄酮含量的增加与其他营养成分和次生物质的共同作用会延长各龄平均历期，这与直接相关分析完全一致，它更准确反映了黄酮含量与其他因素的共同作用对各龄平均历期的综合影响程度。单宁（Y_2）、总酚（Y_3）与各龄的综合相

表 4 思茅松毛虫第 1 代各龄幼虫平均历期与马尾松针营养物质以及次生物质含量的直接相关系数

Table 4 Direct correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and the average developmental duration of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

各龄 Each instar	黄酮 Flavones Y_1	单宁 Tannins Y_2	总酚 Total phenols Y_3	可溶性糖 Soluble sugars Y_4	多糖 Polysaccharides Y_5	蛋白质 Proteins Y_6
1 龄 1st instar x_1	0.997**	−0.038	0.028	−0.973*	−0.970*	−0.989*
2 龄 2nd instar x_2	0.978*	−0.142	−0.086	−0.927	−0.920	−0.964*
3 龄 3rd instar x_3	0.978*	−0.092	−0.005	−0.991**	−0.961*	−0.934
4 龄 4th instar x_4	0.991**	−0.085	−0.004	−0.994**	−0.970*	−0.956*
5 龄 5th instar x_5	0.992**	−0.031	0.050	−0.998**	−0.982*	−0.968*
6 龄 6th instar x_6	0.783	−0.629	−0.554	−0.751	−0.648	−0.640
7 龄 7th instar x_7	0.991**	0.034	0.099	−0.974*	−0.981*	−0.997**

* $P<0.05$；** $P<0.01$.

表 5 思茅松毛虫第 1 代各龄幼虫死亡率与马尾松针营养物质以及次生物质含量的直接相关系数

Table 5 Direct correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and mortality of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

各龄 Each instar	黄酮 Flavones Y_1	单宁 Tannins Y_2	总酚 Total phenols Y_3	可溶性糖 Soluble sugars Y_4	多糖 Polysaccharides Y_5	蛋白质 Proteins Y_6
1 龄 1st instar x_1	0.964*	−0.116	−0.067	−0.905	−0.906	−0.961*
2 龄 2nd instar x_2	0.873	−0.459	−0.418	−0.777	−0.736	−0.810
3 龄 3rd instar x_3	0.989*	0.048	0.113	−0.972*	−0.981*	−0.998**
4 龄 4th instar x_4	0.850	0.442	0.492	−0.864	−0.930	−0.937
5 龄 5th instar x_5	0.720	−0.615	−0.595	−0.593	−0.541	−0.642
6 龄 6th instar x_6	0.955*	−0.186	−0.138	−0.887	−0.880	−0.940
7 龄 7th instar x_7	0.992**	−0.187	−0.119	−0.958*	−0.934	−0.956*

* $P<0.05$；** $P<0.01$.

关系系数都很小，这与直接相关分析完全一致。可溶性糖(Y_4)、多糖(Y_5)、蛋白质(Y_6)与第1代各龄幼虫平均历期之间的综合相关系数都为负数，相对较大，最大的是与7龄平均历期(X_7)(分别为 -0.0653，-0.0630，-0.0653)，最小的仍是6龄平均历期(X_6)(分别为 -0.0344，-0.0306 和 -0.0311)，但各龄的综合相关系数都差异不大，说明可溶性糖(Y_4)、多糖(Y_5)、蛋白质(Y_6)含量的减少与其他营养成分和次生物质的共同作用会延长各龄平均历期，这与直接相关分析完全一致，它更准确反映了可溶性糖(Y_4)、多糖(Y_5)、蛋白质(Y_6)含量与其他因素的共同作用对各龄平均历期的综合影响程度。

从表6最后一列 $R_i(1)$ 来看，综合相关系数大小依次为可溶性糖(Y_4)、蛋白质(Y_6)、多糖(Y_5)、黄酮含量(Y_1)、单宁(Y_2)、总酚(Y_3)，而且单宁(Y_2)、总酚(Y_3)相对非常小。从表6最后一行 $R_j(2)$ 来看，除6龄平均历期(X_6)外，其他各龄平均历期与松针营养物质以及次生物质指标综合相关系数大小差异不大。

变量组松针营养物质以及次生物质指标与变量组第1代各龄幼虫平均历期之间的综合相关系数 -0.9730，$P<0.01$，有显著性。

从表7来看，不同受害程度松针营养物质以及次生物质指标与第1代各龄幼虫死亡率之间的综合相关系数与表6基本相同。

幼虫的历期、体重、取食量、蛹重、平均死亡率、化蛹率、每雌生殖力与松针营养物质以及次生物质含量的直接相关系数见表8。

从表8来看，黄酮(Y_1)与幼虫发育历期(Z_1)、幼虫平均死亡率(Z_5)存在显著的正相关关系，与7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)存在显著的负相关系数。单宁(Y_2)、总酚(Y_3)与幼虫发育历期(Z_1)、7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、幼虫平均死亡

表6　不同受害程度马尾松针叶营养及次生物质指标与思茅松毛虫第1代各龄幼虫平均历期之间的综合相关系数

Table 6　Integrated correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and the average developmental duration of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

	$T_i r_{ij} C_j / S_F S_f$							$R_i(1)$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	
Y_1	0.0414	0.0404	0.0377	0.0393	0.0397	0.0220	0.0413	0.2619
Y_2	-0.0008	-0.0029	-0.0017	-0.0016	-0.0006	-0.0086	0.0007	-0.0156
Y_3	0.0005	-0.0015	-0.0001	-0.0001	0.0009	-0.0066	0.0017	-0.0051
Y_4	-0.0653	-0.0626	-0.0607	-0.0630	-0.0638	-0.0344	-0.0653	-0.4151
Y_5	-0.0627	-0.0600	-0.0573	-0.0597	-0.0607	-0.0306	-0.0630	-0.3941
Y_6	-0.0650	-0.0631	-0.0579	-0.0607	-0.0618	-0.0311	-0.0653	-0.4050
$R_j(2)$	-0.1519	-0.1497	-0.1401	-0.1458	-0.1463	-0.0893	-0.1499	-0.9730**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表7　不同受害程度马尾松针营养物质以及次生物质指标与思茅松毛虫第1代各龄幼虫死亡率之间的综合相关系数

Table 7　Integrated correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and mortality of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

	$T_i r_{ij} C_j / S_F S_f$							$R_i(1)$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	
Y_1	0.0433	0.0326	0.0469	0.0380	0.0208	0.0419	0.0448	0.2684
Y_2	-0.0025	-0.0084	0.0011	0.0097	-0.0087	-0.0040	-0.0041	-0.0169
Y_3	-0.0013	-0.0066	0.0023	0.0093	-0.0073	-0.0025	-0.0023	-0.0084
Y_4	-0.0668	-0.0488	-0.0742	-0.0613	-0.0299	-0.0642	-0.0703	-0.4154
Y_5	-0.0644	-0.0456	-0.0717	-0.0615	-0.0275	-0.0615	-0.0667	-0.3989
Y_6	-0.0682	-0.0493	-0.0743	-0.0635	-0.0308	-0.0654	-0.0692	-0.4207
$R_j(2)$	-0.1599	-0.1262	-0.1699	-0.1295	-0.0831	-0.1559	-0.1677	-0.9920**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

率(Z_5)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)等都无显著的相关性。可溶性糖(Y_4)与幼虫发育历期(Z_1)、幼虫平均死亡率(Z_5)存在显著的正相关关系，与7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)存在显著的负相关系数。多糖(Y_5)与幼虫发育历期(Z_1)存在显著负相关系数，与7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)存在显著的正相关系数。蛋白质(Y_6)与幼虫发育历期(Z_1)存在显著的负相关系数，与雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)存在显著的正相关系数。

幼虫发育历期(Z_1)、7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、幼虫平均死亡率(Z_5)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)的影响系数：

C_3 = (− 0. 3406, 0. 3527, 0. 3533, 0. 3524, −0. 3525, 0. 3497, 0. 3343, 0. 3471)。

从C_3来看，幼虫发育历期(Z_1)、幼虫平均死亡率(Z_5)为负数，7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)都为正数，绝对值大小差异不大。

从表9来看，黄酮含量(Y_1)与幼虫发育历期(Z_1)、幼虫平均死亡率(Z_5)存在正的的综合相关系，与7龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)存在正的的综合负关系数，各相关系数的大小差异不大。

表8　思茅松毛虫种群参数与马尾松针营养物质以及次生物质含量的直接相关系数

Table 8　Direct correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and population parameters of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

指标 Index	发育历期(d) Development duration Z_1	7龄幼虫体重(g) Body weight of 7th instar larva Z_2	取食量(g) Feeding capacity Z_3	蛹重(g) Pupal weight Z_4	幼虫平均死亡率(%) Larval mortality Z_5	化蛹率(%) Pupation rate Z_6	雌性比 Female ratio Z_7	每雌生殖力(粒) Number of eggs laid per female Z_8
黄酮 Flavones Y_1	0.996**	−0.960*	−0.961*	−0.938	0.955*	−0.968*	−1.000**	−0.990*
单宁 Tannins Y_2	−0.126	−0.024	0.041	0.098	−0.098	0.145	0.081	0.096
总酚 Total phenols Y_3	−0.050	−0.114	−0.050	0.004	−0.006	0.057	0.009	0.014
可溶性糖 Soluble sugars Y_4	−0.985*	0.993**	0.990*	0.972*	−0.981*	0.981*	0.982*	0.993**
多糖 Polysaccharides Y_5	−0.961*	0.973*	0.960*	0.931	−0.943	0.941	0.969*	0.966*
蛋白质 Proteins Y_6	−0.960*	0.932	0.920	0.881	−0.901	0.912	0.979*	0.951*

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表9　马尾松针营养物质以及次生物质含量与第1代思茅松毛虫种群参数之间的综合相关系数

Table 9　Integrated correlation coefficient between contents of nutrients/secondary substances in masson pine needles and population parameters of the 1st generation larvae of *Dendrolimus kikuchii*

	$T_i r_{ij} C_j / S_F S_f$								$R_i(1)$
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	
Y_1	0.0561	−0.0560	−0.0561	−0.0547	0.0557	−0.0560	−0.0552	−0.0568	−0.2230
Y_2	0.0035	−0.0007	0.0012	0.0028	0.0028	0.0041	0.0022	0.0026	0.0183
Y_3	0.0012	−0.0028	−0.0012	0.0001	0.0001	0.0014	0.0003	0.0003	−0.0004
Y_4	0.0518	0.0539	0.0539	0.0528	0.0534	0.0529	0.0506	0.0531	0.4224
Y_5	0.0471	0.0494	0.0489	0.0473	0.0479	0.0474	0.0467	0.0483	0.3829
Y_6	0.0492	0.0494	0.0490	0.0467	0.0479	0.0480	0.0493	0.0497	0.3892
$R_j(2)$	0.2088	0.0934	0.0957	0.0950	0.2076	0.0979	0.0938	0.0972	0.9893**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

单宁(Y_2)、总酚(Y_3)与幼虫发育历期(Z_1)、7 龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、幼虫平均死亡率(Z_5)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)的综合相关系数都非常小。

可溶性糖(Y_4)、多糖(Y_5)、蛋白质(Y_6)与幼虫发育历期(Z_1)、7 龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、幼虫平均死亡率(Z_5)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)的存在正的综合相关系数，各系数间的差异不大。

从表 9 最后一列 $R_i(1)$ 来看，综合相关系数大小依次为可溶性糖(Y_4)、蛋白质(Y_6)、多糖(Y_5)、黄酮含量(Y_1)、单宁(Y_2)、总酚(Y_3)，而且单宁(Y_2)、总酚(Y_3)相对非常小。从表 9 最后一行 $R_j(2)$ 来看，幼虫发育历期(Z_1)、幼虫平均死亡率(Z_5)与松针营养物质以及次生物质指标综合相关系数相对较大，与 7 龄幼虫体重(Z_2)、幼虫平均取食量(Z_3)、蛹重(Z_4)、化蛹率(Z_6)、雌性比(Z_7)、每雌生殖力(粒)(Z_8)综合相关系数相对较小，而且相互差异不大。

3 结论与讨论

通过以上分析，可以得出以下结论：

(1)黄酮含量与第 1 代思茅松毛虫各龄幼虫平均历期、死亡率呈显著的正相关，表示随危害程度加重，黄酮含量增加，各龄幼虫平均历期、死亡率也增加。单宁、总酚对各龄幼虫平均历期、死亡率没有显著的相关性。可溶性糖、蛋白质、多糖与第 1 代各龄幼虫平均历期、死亡率有显著的负相关关系，表示随危害程度加重，可溶性糖、蛋白质、多糖含量减少，各龄幼虫平均历期延长，死亡率升高。

(2)6 龄幼虫平均历期、死亡率受松针营养物质以及次生物质含量的直接影响和综合影响都没有显著性，其他各龄幼虫的平均历期、死亡率受松针营养物质以及次生物质含量的直接影响和综合影响都有显著性。

(3)黄酮对幼虫发育历期、幼虫平均死亡率存在显著的正相关影响，表示随危害程度加重，黄酮含量增加，各龄幼虫平均历期、死亡率也增加。对 7 龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、化蛹率、雌性比、每雌生殖力存在显著的负相关影响，表示随危害程度加重，黄酮含量增加，7 龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、化蛹率、雌性比、每雌生殖力减小。单宁、总酚对幼虫发育历期、7 龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、幼虫平均死亡率、化蛹率、雌性比、每雌生殖力都没有显著影响。可溶性糖、蛋白质、多糖对幼虫发育历期、幼虫平均死亡率存在显著的正相关关系，表示随危害程度加重，可溶性糖、蛋白质、多糖含量减少，幼虫发育历期、幼虫平均死亡率增大；对 7 龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、化蛹率、雌性比、每雌生殖力有显著的正向影响作用，表示随危害程度加重，可溶性糖、蛋白质、多糖含量减少，7 龄幼虫体重、幼虫平均取食量、蛹重、化蛹率、雌性比、每雌生殖力也减小。

(4)松针营养物质以及次生物质含量对思茅松毛虫种群参数影响的重要性依次为：可溶性糖、蛋白质、多糖、黄酮、单宁、总酚，而且单宁、总酚作用相对较小。

(5)综合相关系数分析所得的各种结果之间非常协调一致，与实际也基本相符。如：无论从直接相关系数还是综合相关系数，黄酮含量都与第 1 代各龄幼虫平均历期、死亡率呈显著的正相关，实际情况也是随危害程度加重，黄酮含量增加，第 1 代各龄幼虫平均历期、死亡率也都增大，分析结果基本具有一致性，与实际情况也基本一致。

戈峰等(1997)和章康华等(2002)研究表明：松针被马尾松毛虫为害后，针叶的氨基酸含量减少，单宁和总酚含量增加。马尾松毛虫取食被害松针后，其种群参数表现出发育历期延长、体重减轻、取食量减少、死亡率增加、生殖力下降的变化，与本文结论基本一致。但与本文结果也存在一些差异，可能是因为：(1)研究的对象不同，本文研究对象思茅松毛虫，而戈峰等(1997)研究的是马尾松毛虫，其习性略有不同；(2)饲养方式不同，本研究采用上代幼虫被害后松针叶喂养，戈峰等(1997)采用不同的新老叶喂养；(3)分析测定的指标不完全相同。此外，本文进一步通过直接相关和综合相关分析，很好地揭示了不同指标间、不同指标组合间的复杂关系。

Masttsten 等(1987)认为，寄主植物中某些营养物质和次生物质的质与量的变化对害虫生长发育及代谢有相当大影响。从目前国内外有关昆虫与植物相互作用关系的研究报告来看，主要集中于研究短期反应，着重于从生理学的角度探讨植物受害后化学物质的迅速反应变化；而对长期反应，分析这种

诱导作用对昆虫下个世代的影响研究较少(章康华等，2002；李海林等，2005)。本研究表明思茅松毛虫幼虫取食受上一代幼虫不同程度危害的针叶后，幼虫的发育历期延长、体重下降、食量减少、死亡率上升，还导致蛹重及生殖力下降；这可能与松树受害后，对害虫所产生的应激反应及其对害虫子代造成的影响有关。由于针叶的营养物质和次生物质发生变化，单宁、黄酮、总酚含量显著增加，蛋白质、多糖、可溶性糖含量显著下降，这可能是造成思茅松毛虫种群参数变化的主要原因之一，为揭示思茅松毛虫周期性暴发提供了一个有力证据。

参考文献(References)

Chen HS, Zhang CJ, Zhang SL, Wang LP, Chen SL, 2003. Preliminary study on the spatial distribution pattern and sampling technique of larvae of *Dendrolimus kikuchii* Matsumura. *Entomological Journal of East China*, 12(2): 61－64. [陈宏胜，张潮巨，张思禄，王玲萍，陈顺立，2003. 思茅松毛虫幼虫空间格局与抽样技术的初步研究. 华东昆虫学报，12(2): 61－64]

Du RQ, Wu FH, Wang QL, Zhang ZT, Chen SL, 2009. Correlation analysis of population size of *Hemiberlesia pitysophila* (Homoptera: Diaspididae), environmental factors and the hazard degree of masson pine. *Acta Entomologica Sinica*, 52(5): 544－550. [杜瑞卿，武福华，王庆林，张征田，陈顺立，2009. 松突圆蚧数量、环境因子及马尾松受危害程度三者间的相关性分析. 昆虫学报，52(5): 544－550]

Ge F, Li DM, Qiu YX, Wang GH, 1997. Studies on the changes of some chemicals in damaged pine needles and their effects on population parameters of pine caterpillar. *Acta Entomologica Sinica*, 40(4): 337－342. [戈峰，李典谟，邱业先，王国红，1997. 松树受害后一些化学物质含量的变化及其对马尾松毛虫种群参数的影响. 昆虫学报，40(4): 337－342]

Ge F, Li ZY, Xie YP, Li YF, 2002. Some characteristics of induced resistance of China pines to pest population dynamics. *Journal of Beijing Forestry University*, 24(3): 161－165. [戈峰，李镇宇，谢映平，李艳芳，2002. 我国主要松树诱导抗虫性的一些规律比较. 北京林业大学学报，24(3): 161－165]

Hao JJ, Kang ZL, Yu Y, 2007. Experimental Technology of Plant Physiology. Chemical Industry Press, Beijing. 141－142. [郝建军，康宗利，于洋，2007. 植物生理学实验技术. 北京：化学工业出版社. 141－142]

He Z, Cao HZ, Zeng JP, Liang YY, Han RD, Ge F, 2007. Feeding preference of *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidoptera: Lasiocampidae) on pines *Pinus massoniana* and *P. elliottii*. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 125－135. [何忠，曹红珍，曾菊平，梁玉勇，韩瑞东，戈峰，2007. 马尾松毛虫对马尾松和湿地松的选择与适应研究. 昆虫学报，50(2): 125－135]

Li GQ, Wang YC, 1997. The influence of nutrients and secondary substances on the resistance of plant against insect pest. *Plant Physiology Communications*, 6: 113－115. [李国清，王荫长，1997. 营养和次生物质与植物的抗虫性. 植物生理学通报，6: 113－115]

Li HL, Li ZY, Zhang LL, 2005. Influence of pines damaged to different degrees on population quantity of *Dendrolimus punctatus*. *Forest Pest and Disease*, 24(6): 1－5. [李海林，李镇宇，张丽丽，2005. 取食不同受害程度的马尾松对马尾松毛虫种群数量的影响. 中国森林病虫，24(6): 1－5]

Li HS, 2001. Experimental Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry. Higher Education Press, Beijing. 184－185. [李合生，2001. 植物生理生化实验原理和技术. 北京：高等教育出版社. 184－185]

Li RB, Chai SQ, Xu GL, Duan ZY, Xie KL, Li GY, 2002. A preliminary study on forecast of the occurrence period of *Dendrolimus kikuchii*. *Journal of Southwest Forestry College*, 22(4): 49－52. [李任波，柴守权，许国莲，段兆尧，谢开立，李广英，2002. 思茅松毛虫发生期预测预报研究初报. 西南林学院学报，22(4): 49－52]

Li ZY, Wang Y, Chen HS, Xu ZC, Lu YB, 2000. Induced chemical defenses and delayed induced resistance of *Pinus tabulaeformis* Carr. to *Dendrolimus spectabilis* Butler. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(1): 66－70. [李镇宇，王燕，陈华盛，许志春，路永波，2000. 油松对赤松毛虫的诱导化学防御及滞后诱导抗性. 林业科学，36(1): 66－70]

Masttsten MJ, Haack RA, 1987. Insect population dynamics and induction of plant resistance: the testing of hypothesis. In: Barbosa P, Schultz TC eds. Insect Outbreaks. Academic Press, San Diego. 411－432.

Wu C, 2006. Analysis of the occurrence of *Dendrolimus kikuchii* in Ninghua County, Fujian Province. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 33(1): 235－236. [伍澄，2006. 宁化县思茅松毛虫发生情况分析. 福建林业科技，33(1): 235－236]

Yan SC, Li JG, Wen AT, Cheng H, Xu W, Zhang YB, 2006. Association between the damage of *Xylotrechus rusticus* (Coleoptera: Cerambycidae) and the compositions and contents of amino acids in different poplar strains. *Acta Entomologica Sinica*, 49(1): 93－99. [严善春，李金国，温爱亭，程红，徐伟，张玉宝，2006. 青杨脊虎天牛的危害与杨树氨基酸组成和含量的相关性. 昆虫学报，49(1): 93－99]

Zhang KH, Chen CP, Liu XP, Ge F, Wang GH, Li DM, 2002. Influences of induced resistance of pine on growth and development of the larvae of pine caterpillar. *Entomological Knowledge*, 39(4): 292－296. [章康华，陈春平，刘兴平，戈峰，王国红，李典谟，2002. 马尾松诱导抗性对马尾松毛虫幼虫生长发育的影响. 昆虫知识，39(4): 292－296]

Zhu JH, Chen SL, Zhang ZF, 2002. Forecast of Forest Diseases and Insect Pests. Xiamen University Press, Xiamen. 159－192. [朱建华，陈顺立，张再福，2002. 森林病虫害预测预报，厦门：厦门大学出版社. 159－192]

(责任编辑：武晓颖)